

Artículo original

Análisis comparativo de actuadores SSR y por recorte de onda en procesos térmicos

Javier Rivadeneira Mendoza ^[1]  José Muñoz Sánchez ^[1]  Jorge Zevallos Zambrano ^[1]  Yimy Zambrano Zambrano ^[1]  Edgar Palacios Castro ^[2] 

[1] Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López" (ESPAM MFL). Calceta, Ecuador.

[2] Instituto Superior Tecnológico "Paulo Emilio Macías" (ISTPEM). Portoviejo, Ecuador.



Autor para correspondencia: jarivadeneira@espam.edu.ec

Resumen

En los procesos térmicos industriales de la región predomina el uso de esquemas de control encendido-apagado (on-off), los cuales generan oscilaciones y sobreimpulsos que reducen la eficiencia energética y comprometen la calidad del producto. Dejando de lado este enfoque ineficiente mediante la adopción de un control Proporcional-Integral (PI) como estándar, este estudio tuvo como objetivo comparar el desempeño de dos actuadores de potencia para determinar la alternativa óptima y viable para su implementación regional. Se evaluó un relé de estado sólido (SSR) con modulación por ráfagas de voltaje y un regulador por recorte de onda (TRIAC) por control de fase. Metodológicamente, se desarrolló un modelo matemático de caja blanca de una planta térmica representativa, se obtuvo su función de transferencia a 50 °C y se diseñó un controlador PI sintonizado en MATLAB y Simulink. Ambos actuadores se incorporaron en lazo cerrado bajo una secuencia idéntica de cambios de consigna para evaluar su velocidad de respuesta, sobreimpulso y comportamiento energético. Los resultados evidenciaron que el recortador de onda ofrece un rastreo lineal sin sobreimpulsos, mientras que el SSR presenta oscilaciones transitorias mitigadas por la inercia térmica de la carga y la acción integral. Se concluye que, aunque el recortador de onda posee mayor precisión dinámica, introduce alta distorsión armónica. El SSR constituye la opción óptima para la región debido a su robustez, bajo costo y nulo impacto armónico, resultando idóneo para automatizar procesos resistivos en contextos con recursos limitados como el secado agroindustrial de café y cacao.

Palabras Clave: *control de procesos; relé de estado sólido; control de fase; control proporcional integral; automatización industrial.*

Article

Comparative Analysis of SSR and Phase-Cutting Actuators in Thermal Processes

Abstract

In the industrial thermal processes of the region, the use of on-off control schemes predominates, generating oscillations and overshoots that reduce energy efficiency and compromise product quality. Leaving aside this inefficient approach through the adoption of a Proportional-Integral (PI) control as a standard, this study aimed to compare the performance of two power actuators to determine the most optimal and viable alternative for regional implementation. A solid-state relay (SSR) with voltage burst modulation and a phase-cutting voltage regulator (TRIAC) operating through phase control were evaluated. Methodologically, a white-box mathematical model of a representative thermal plant was developed, its transfer function was obtained at 50 °C, and a tuned PI controller was designed in MATLAB and Simulink. Both actuators were incorporated into the closed loop under an identical sequence of setpoint changes to evaluate their response speed, overshoot, and energy behavior. The results showed that the phase-cutting actuator provides linear tracking without overshoots, whereas the SSR exhibits transient oscillations mitigated by the load's thermal inertia and the integral action. It is concluded that although the phase-cutting actuator has greater dynamic precision, it introduces high harmonic distortion. The SSR constitutes the most optimal choice for the region due to its robustness, low cost, and zero harmonic impact, making it ideal for automating resistive processes in resource-limited contexts such as the agro-industrial drying of coffee and cocoa.

Keywords: *process control; solid-state relay; phase control; proportional-integral control; industrial automation.*

Cita sugerida: Rivadeneira Mendoza, J., Muñoz Sánchez, J., Zevallos Zambrano, J., Zambrano Zambrano, Y., & Palacios Castro, E. (2026). Análisis comparativo de actuadores SSR y por recorte de onda en procesos térmicos. *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*, 9(18), 135-142. <https://doi.org/10.56124/finibus.v9i18.011>

DOI : <https://doi.org/10.56124/finibus.v9i18.011>
Recibido: 24-02-2026 Revisado: 15-05-2026
Aceptado: 17-06-2026 Publicado: 01-07-2026

1. Introducción

El control preciso de procesos térmicos constituye uno de los desafíos centrales de la ingeniería de control aplicada a sistemas industriales y agroindustriales. En sistemas donde la generación de calor depende de resistencias eléctricas alimentadas en corriente alterna, la dinámica térmica suele ser lenta, no lineal y susceptible a perturbaciones ambientales, lo que dificulta mantener la temperatura en un punto de operación estable sin la intervención de un lazo de control automático (Chang et al., 2024; Yu et al., 2025). Para regular esta variable sin depender de un operador, se requiere un sistema de lazo cerrado en el que un controlador, típicamente del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (Åström & Murray, 2021; Seborg et al., 2020), recibe la señal de un sensor de temperatura, la compara con el valor de consigna y actúa sobre un elemento final de control, como un banco de resistencias o un ventilador.

A pesar de la disponibilidad de tecnologías de control modernas, una parte significativa de la pequeña y mediana industria en Latinoamérica continúa operando con esquemas rústicos de encendido-apagado (on-off), controlados por pirómetros básicos y contactores magnéticos (Acuña Bravo et al., 2022). Esta práctica, motivada por la simplicidad de instalación y por la percepción de que el control proporcional es costoso o difícil de mantener en campo, genera oscilaciones continuas y sobre impulsos térmicos derivados de la inercia del calentamiento resistivo. En procesos sensibles a la temperatura, estos picos térmicos superan los límites tolerados por la materia procesada, ocasionando pérdidas energéticas y degradación de la calidad del producto. Un caso representativo de esta problemática se observa en el secado agroindustrial de granos como el café y el cacao, donde la inestabilidad térmica induce un estrés calórico que degrada compuestos organolépticos y nutricionales (Osorio & Pabón, 2022; Velásquez & Banchón, 2023); no obstante, el mismo fenómeno se replica en cualquier proceso térmico resistivo que carezca de una dosificación adecuada de la energía.

Migrar estos sistemas hacia un esquema de Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) (Ogata, 2020; Seborg et al., 2020) exige, además del algoritmo de control, seleccionar un actuador de potencia capaz de dosificar con precisión la energía entregada al elemento calefactor. Para este propósito existen dos tecnologías principales: los relés de estado sólido (SSR), que conmutan ráfagas completas de voltaje en corriente alterna, y los reguladores de voltaje por recorte de onda mediante TRIAC, que varían de forma continua el voltaje eficaz entregado a la carga según el ángulo de disparo (Lumbreras et al., 2020). Ambas tecnologías presentan compromisos distintos entre precisión dinámica, costo, complejidad de implementación y calidad de la energía entregada a la red eléctrica, por lo que su

selección no es trivial y requiere un análisis comparativo riguroso antes de su implementación en campo.

La relevancia de este trabajo radica en evaluar, desde una perspectiva de ingeniería de control y mediante simulación, qué actuador de potencia ofrece el mejor equilibrio entre desempeño dinámico, eficiencia energética y viabilidad de implementación para procesos térmicos resistivos. Si bien el estudio toma como caso de validación un secador agroindustrial de flujo estático, los principios analizados — el modelado por caja blanca, la linealización en el punto de operación y la comparación de actuadores de potencia — son generalizables a cualquier proceso industrial que requiera el control preciso de una variable térmica mediante calentamiento resistivo, tales como hornos, cámaras de curado, sistemas de pasteurización o procesos de secado industrial en general.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es determinar, mediante simulación en *MATLAB* y *Simulink*, el actuador de potencia más adecuado para el control de un proceso térmico resistivo, comparando el desempeño de un esquema basado en relé de estado sólido (SSR) frente a un esquema de recorte de onda (TRIAC), utilizando como caso de validación un secador agroindustrial de café.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se adoptó un enfoque de modelamiento matemático y simulación numérica en el entorno *MATLAB* y *Simulink*. Se seleccionó como caso de validación un secador agroindustrial de flujo estático tipo silo, cuyo principio de funcionamiento se basó en la generación de calor mediante un banco de resistencias eléctricas alimentadas en corriente alterna. El objetivo metodológico consistió en evaluar y comparar el impacto de dos tecnologías de actuación sobre la dosificación de la energía entregada a la carga resistiva: un esquema de conmutación por relé de estado sólido (SSR), que emuló el comportamiento de una modulación por ráfagas de voltaje en ciclos completos de red, y un esquema de control por recorte de onda mediante TRIAC, que varió el voltaje eficaz (Vrms) entregado a la carga de forma lineal entre 0 y 220 V en función del ángulo de disparo. Se sometió al sistema a una temperatura de consigna constante de 50 °C, valor que representa un punto de operación estándar para evitar la degradación térmica del proceso.

Dado que el estudio se desarrolló íntegramente mediante simulación numérica y modelamiento analítico, no involucró la participación de seres humanos ni de animales, ni el uso de datos personales o sensibles. En consecuencia, el desarrollo del trabajo no vulneró ninguna normativa ética vigente y, conforme a los lineamientos del Consejo Científico y el Comité de Ética de la institución de procedencia de los autores, quedó exento de la evaluación por parte de dicho comité institucional.

2.1. Modelamiento matemático de la planta (caja blanca)

Se aplicó la técnica de modelamiento por caja blanca (Close et al., 2019) sobre la estructura de la planta térmica, fundamentada en las leyes de la termodinámica. El balance de energía térmica transitoria en la cámara se definió de acuerdo con la relación establecida en (1):

$$Q_T = Q_R - (Q_1 + Q_P) \quad (1)$$

Donde cada componente se desglosó a partir de las propiedades físicas de los materiales. La energía suministrada por las resistencias mediante la ley de Joule se expresó a través de (2), el calor absorbido por la masa del producto y las pérdidas térmicas disipadas por las paredes se determinaron respectivamente mediante (3) y (4), y el calor acumulado por el volumen de aire dentro del recinto cerrado se calculó mediante (5):

$$Q_R = V_t^2 / R \quad (2)$$

$$Q_1 = m_{grano} \times C_{grano} \times \frac{dT_R}{dt} \quad (3)$$

$$Q_P = m_{paredes} \times C_{acero} \times \frac{dT_R}{dt} \quad (4)$$

$$Q_T = V_{sec} \times C_{aire} \times \rho_{aire} \times \frac{dT_R}{dt} \quad (5)$$

Al sustituir estas relaciones en el balance general de (1), se obtuvo la ecuación diferencial ordinaria no lineal de primer orden que gobierna la planta, representada en (6), la cual se agrupó en su forma compacta en (7), donde K1 corresponde a la constante de inercia térmica y K4 a la constante de disipación:

$$\left(V_{sec} C_{aire} \rho_{aire} + m_{grano} C_{grano} + m_{paredes} C_{acero} \right) \frac{dT_R}{dt} = \frac{V_t^2}{R} - \frac{1}{R_{amb}} (T_R - T_{amb}) \quad (6)$$

$$K_1 \frac{dT_R}{dt} + K_4 T_R = \frac{V_t^2}{R} + (K_4 T_{amb}) \quad (7)$$

2.2. Linealización y función de transferencia

Debido a que la entrada de voltaje ingresó de forma cuadrática (V_t^2), el sistema resultó no lineal. El término de potencia se linealizó mediante una expansión en series de Taylor alrededor del punto de operación estacionario ($T_0 = 50^\circ\text{C}$), que requirió un voltaje de mantenimiento constante (V_0). Definiendo las variables incrementales $\Delta TR = TR - T_0$ y $\Delta V_t = V_t - V_0$, la aproximación lineal se describió en (8), y al sustituirla en (7) se obtuvo la ecuación diferencial lineal incremental descrita en (9), donde K5 representa la ganancia incremental de potencia del actuador:

$$\frac{V_t^2}{R} \approx \frac{V_0^2}{R} + \left(\frac{2V_0}{R} \right) \Delta V_t \quad (8)$$

$$K_1 \frac{d(\Delta T_R)}{dt} + K_4 (\Delta T_R) = K_5 (\Delta V_t) \quad (9)$$

Se aplicó la Transformada de Laplace bajo la premisa de condiciones iniciales nulas ($\Delta TR(0) = 0$), trasladando la ecuación diferencial al dominio de la frecuencia compleja, lo que resultó en la expresión (10). Al despejar la relación entre la variable de salida (temperatura) y la variable de entrada (voltaje), se dedujo la función de transferencia del modelo Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI) de primer orden formulada en (11):

$$K_1 S \times T(s) + K_4 T(s) = K_5 V(s) \quad (10)$$

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{K_5}{K_1 S + K_4} \quad (11)$$

Al evaluar numéricamente las constantes físicas y los coeficientes térmicos de la planta para la carga operativa de 150 kg, se obtuvo la función de transferencia experimental empleada en las simulaciones, detallada en (12):

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{4.01}{1850s + 13.58} \quad (12)$$

2.3. Diseño y sintonización del controlador

La función de transferencia obtenida en (12) se introdujo en el entorno Simulink dentro de una configuración de lazo cerrado con retroalimentación negativa, tal como se ilustra en la Figura 1. Las ganancias del controlador Proporcional-Integral (PI) se calcularon mediante la función de sintonización automática (Auto-tune) integrada en el bloque PID de Simulink, la cual linealizó el lazo en el punto de operación de forma interna. Los parámetros de configuración seleccionados dentro de la interfaz gráfica se ilustran en la Figura 2.

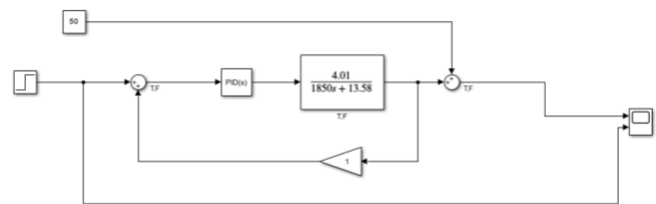


Figura 1. Implementación en Simulink del modelo de lazo cerrado basado en la función de transferencia de la Ecuación (12), empleado para el diseño del controlador PI.

2.4. Modelado de los actuadores de potencia y arquitectura de simulación

Una vez sintonizado el controlador PI, se sustituyó la acción de control ideal y se incorporaron los bloques lógicos y

matemáticos personalizados de los dos actuadores evaluados. Para el esquema del relé de estado sólido (SSR) se desarrolló un modelo de conmutación basado en modulación por ráfagas, que entregó ciclos completos de voltaje en corriente alterna. Para el regulador por recorte de onda (TRIAC) se programó la ecuación que calculó el voltaje eficaz (Vrms) de salida de forma continua entre 0 y 220 V según el ángulo de disparo. Se estructuraron tres modelos en paralelo dentro del mismo entorno —el modelo

ideal, el modelo con actuador por recorte de onda y el modelo con actuador SSR—, cuya arquitectura conjunta se muestra en la Figura 3, lo que permitió ejecutar las simulaciones bajo condiciones idénticas y comparar cuantitativamente la velocidad de respuesta, la estabilidad térmica y el consumo eléctrico estimado para cada tecnología (Yu et al., 2025).

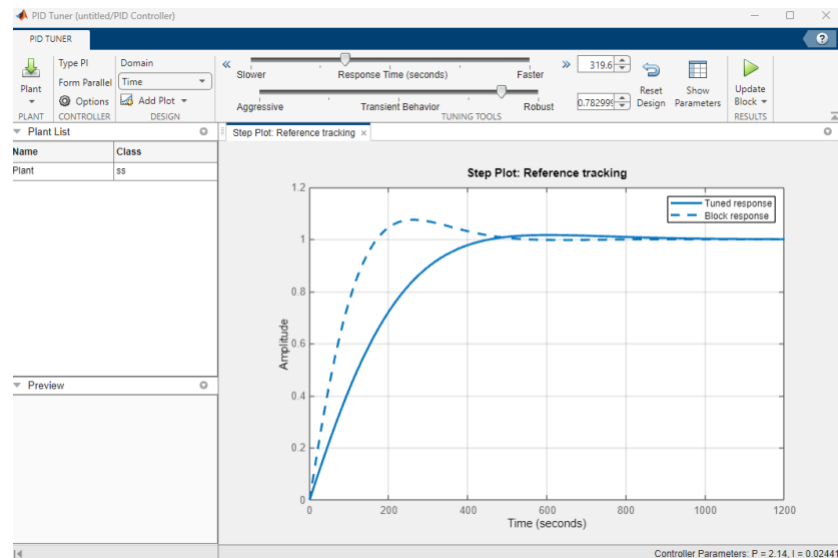


Figura 2. Parámetros de configuración del bloque PID Controller de Simulink en modo de control PI, obtenidos mediante la herramienta Auto-tune.

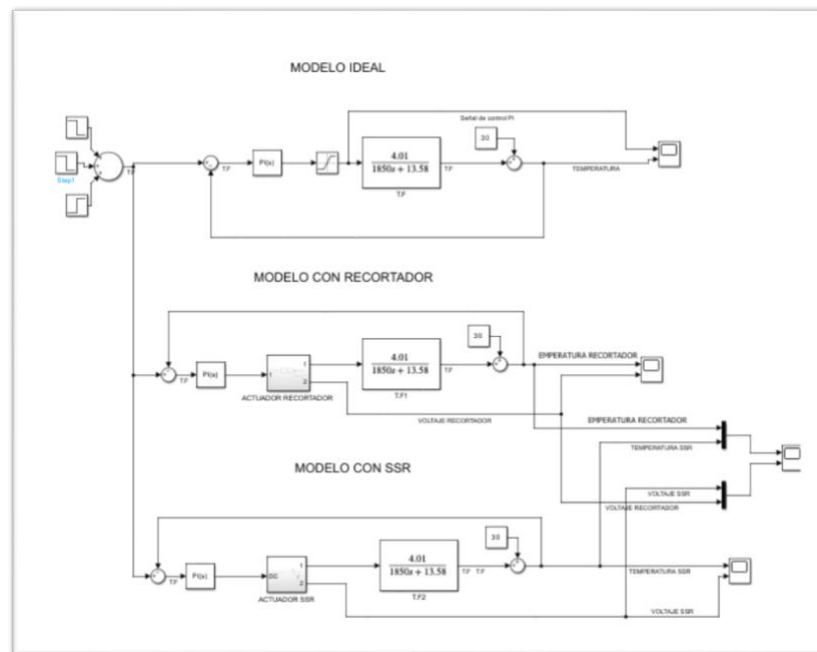


Figura 3. Arquitectura general en Simulink para la simulación en paralelo del modelo ideal frente a los modelos con actuador por recorte de onda y con actuador SSR.

2.5. Parámetros físicos de la planta y nomenclatura

Los parámetros físicos de la planta real empleados en el entorno de simulación fueron los siguientes: volumen útil de la cámara (Vsec) de 0.75 m³, masa estructural de 45 kg correspondiente a las paredes de acero del secador, masa operativa del producto equivalente a una carga constante de 150 kg, calor específico de diseño (Cgrano) de 0.65 Wh/kg·°C, y un elemento calefactor basado en un banco de resistencias eléctricas de tipo resistivo puro. El procesamiento de los datos dinámicos y el cálculo analítico de la función de transferencia se ejecutaron en MATLAB, mientras que el lazo cerrado, la inyección de perturbaciones y el modelado de los actuadores se implementaron en Simulink. La nomenclatura completa de las variables y constantes empleadas en el modelo se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura de variables, constantes y parámetros empleados en el modelo matemático.

Símbolo	Descripción	Unidad
QT	Calor total acumulado en la cámara secado	W
QR	Calor suministrado por el banco de resistencias (ley de Joule)	W
Q1	Calor absorbido por la masa de producto	W
QP	Pérdidas térmicas disipadas por las paredes de la estructura	W
Vsec	Volumen útil de la cámara de secado	m ³
Cgrano	Calor específico de diseño del producto	Wh/kg·°C
mgrano	Masa operativa del producto dentro de la cámara	kg
mparedes	Masa estructural de las paredes del secador	kg
Cacero	Calor específico del acero estructural	Wh/kg·°C
Caire, paire	Calor específico y densidad del aire dentro de la cámara	Wh/kg·°C, kg/m ³
TR	Temperatura de la cámara de secado (variable controlada)	°C
Tamb	Temperatura ambiente	°C
Vt	Voltaje instantáneo aplicado a la carga resistiva	V
R	Resistencia eléctrica de la carga	Ω
K1	Constante de inercia térmica del sistema	-
K4	Constante de disipación térmica (pérdidas por convección)	-
K5	Ganancia incremental de potencia del actuador	-

V0, T0	Voltaje y temperatura en el punto de operación	V, °C
Kp, Ki	Ganancias proporcional e integral del controlador PI	-

3. Resultados

Las ganancias del controlador Proporcional-Integral obtenidas mediante la función de sintonización automática (Auto-tune) de Simulink fueron Kp = 2.1401 y Ki = 0.0244. Estos parámetros se mantuvieron constantes para ambos esquemas de actuación durante todo el proceso de simulación, lo que permitió aislar el efecto del tipo de actuador sobre la respuesta del sistema. Bajo estas condiciones, se ejecutaron en paralelo los tres modelos descritos en la Figura 3, sometiendo al sistema a una secuencia idéntica de cambios de consigna: 50 °C, 30 °C, 42 °C y nuevamente 50 °C.

Al emplear el actuador por recorte de onda, se registró el comportamiento expuesto en la Figura 4. La temperatura se estabilizó en cada punto de operación sin presentar sobreimpulsos ni oscilaciones visibles, y el voltaje eficaz se ajustó de forma continua, recortando progresivamente los semiciclos de la onda conforme la temperatura se aproximó a cada consigna.

Bajo la misma secuencia de consignas, el actuador SSR registró el comportamiento expuesto en la Figura 5. Durante el arranque en frío (de 30 °C a 50 °C) se presentó un sobreimpulso por encima del valor de consigna antes de estabilizarse. En la transición descendente hacia los 42 °C, la temperatura descendió temporalmente por debajo del valor de consigna antes de recuperarse. En la transición final de retorno a 50 °C, la magnitud del sobreimpulso se redujo de forma notoria respecto al transitorio inicial.

La comparación simultánea de ambos actuadores ante la misma secuencia de consignas se presenta en la Figura 6. Las curvas de temperatura del recortador de onda y del SSR convergieron al mismo valor en régimen permanente en cada punto de operación, mientras que el SSR exhibió mayores desviaciones transitorias durante los cambios de consigna, particularmente en el arranque inicial. En cuanto a la señal de voltaje, el actuador por recorte de onda entregó un voltaje eficaz continuo y proporcional al error, mientras que el actuador SSR entregó ráfagas discretas de voltaje pleno alternadas con periodos sin suministro.

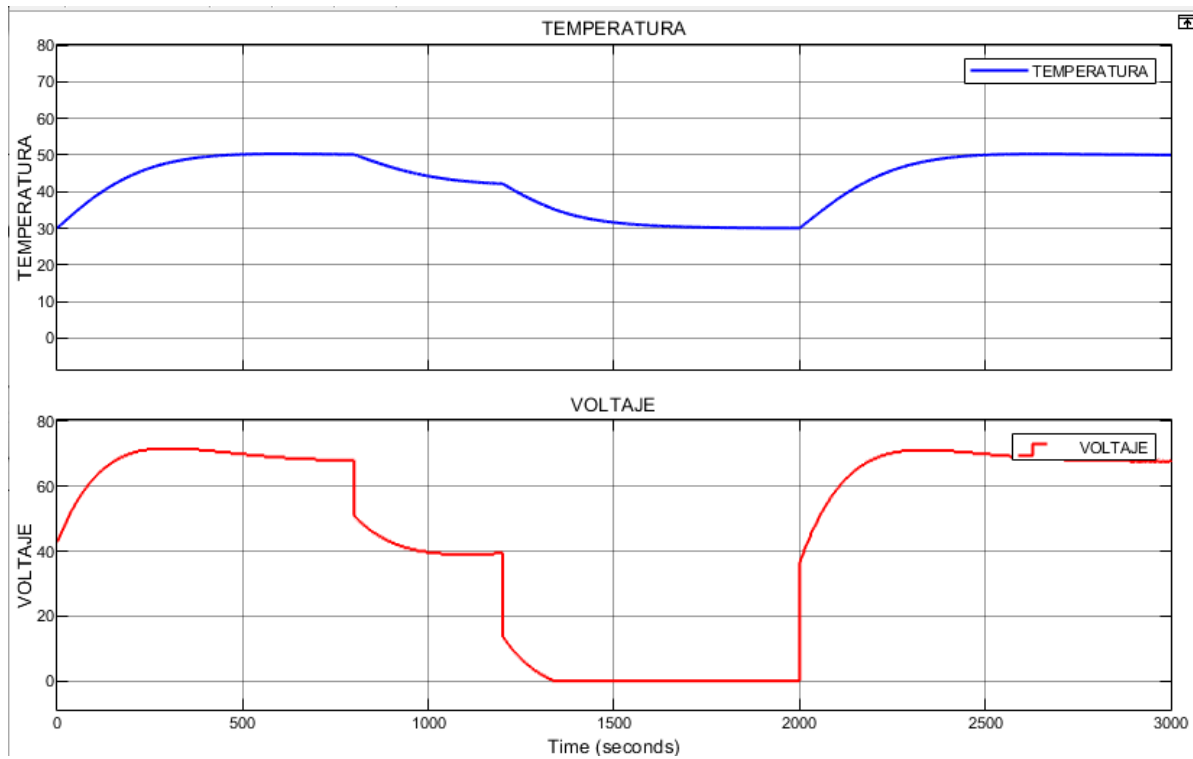


Figura 4. Respuesta dinámica del actuador por recorte de onda ante múltiples puntos de operación. Gráfico superior: rastreo de temperatura (°C). Gráfico inferior: voltaje aplicado (V) en función del tiempo (s).

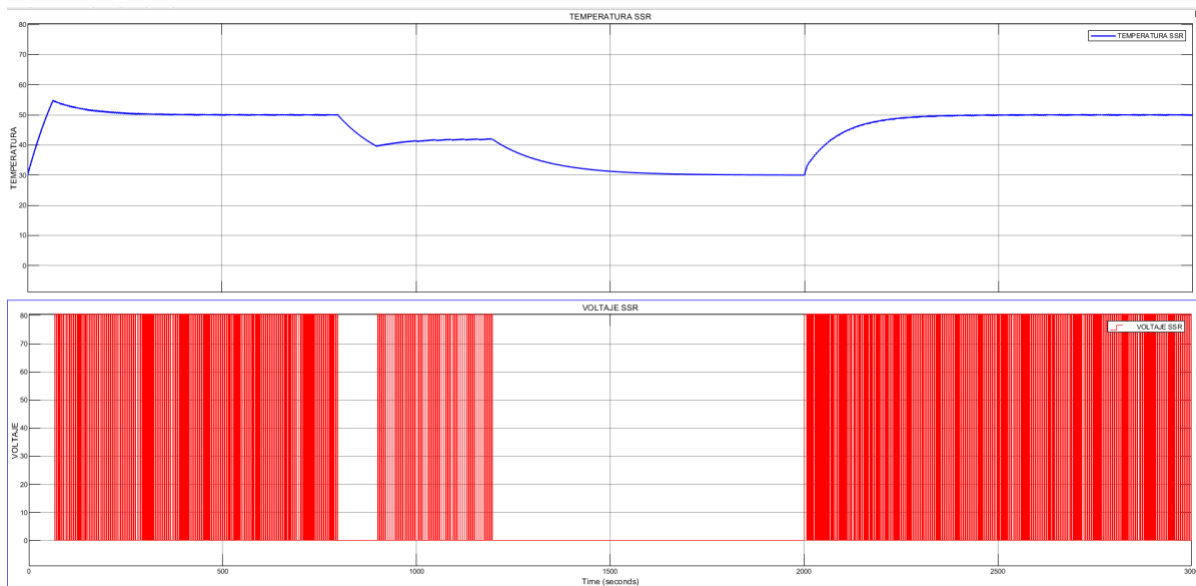


Figura 5. Respuesta dinámica del actuador SSR ante múltiples puntos de operación. Gráfico superior: rastreo de temperatura (°C). Gráfico inferior: modulación por ráfagas de voltaje (V) en función del tiempo (s).

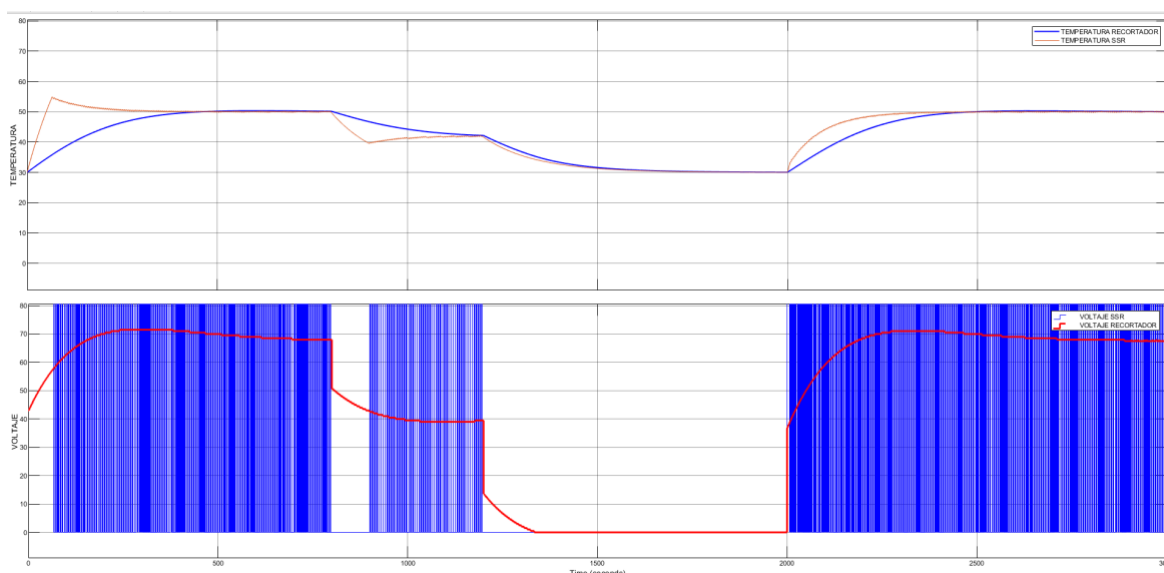


Figura 6. Comparación de la respuesta dinámica de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y voltaje (V) entre el actuador por recorte de onda y el actuador SSR ante múltiples puntos de operación.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten determinar, conforme al objetivo planteado, que la naturaleza del actuador de potencia define de manera determinante la dinámica y la calidad del control en un proceso térmico resistivo. El actuador por recorte de onda demuestra una ventaja clara en exactitud dinámica, al transferir la energía de forma continua y proporcional al error, lo que elimina los sobreimpulsos y reduce el riesgo de degradación térmica del material procesado. No obstante, esta misma conmutación por ángulo de fase introduce una distorsión armónica considerable en la red eléctrica (Lumbreras et al., 2020), un efecto colateral que puede resultar crítico en contextos industriales con infraestructura eléctrica limitada.

Por su parte, el actuador SSR presenta un comportamiento transitorio menos favorable, con sobreimpulsos y oscilaciones visibles durante el arranque en frío y en los cambios de consigna descendentes. Sin embargo, estos efectos se atenúan conforme la acción integral del controlador madura, y la elevada inercia térmica del proceso actúa como un filtro pasabajos natural que promedia los pulsos discretos de voltaje. Esta característica permite que el SSR alcance, en régimen permanente, el mismo nivel de estabilidad que el recortador de onda, sin introducir distorsión armónica ni ruido electromagnético en la red eléctrica, gracias a su conmutación en cruce por cero.

Desde una perspectiva de viabilidad técnica y económica, el SSR se posiciona como la alternativa más adecuada para el escalamiento de estos esquemas de control en la pequeña y mediana industria, particularmente en contextos donde la calidad de la red eléctrica es limitada y el costo de implementación constituye un factor determinante. El

recortador de onda, en cambio, resulta preferible en aplicaciones donde la precisión dinámica sea crítica y la infraestructura eléctrica disponible pueda absorber su impacto armónico.

Este trabajo presenta como limitación principal que los resultados se obtuvieron exclusivamente mediante simulación numérica, a partir de un modelo lineal obtenido por linealización en un único punto de operación; por lo tanto, los hallazgos deben validarse experimentalmente en una planta física antes de generalizarse a otros procesos térmicos. Asimismo, el estudio se limitó a un controlador Proporcional-Integral sintonizado mediante una herramienta automática, sin explorar estrategias de control avanzado.

Como líneas de trabajo futuro, se plantea la validación experimental de estos modelos en una planta piloto instrumentada, así como el diseño de algoritmos de control avanzado, como el control difuso o de ganancia programable, orientados a atenuar el sobreimpulso transitorio inicial del SSR durante el arranque en frío. Estas estrategias podrían extenderse a otros procesos térmicos industriales y agroindustriales que requieran un control preciso de temperatura y una gestión eficiente de la energía (Hosseinpour & Martynenko, 2022; Chen et al., 2020; Chang et al., 2024).

Referencias

- Acuña Bravo, W., Bravo Montenegro, D. A., & Pito, J. C. (2022). Prototipo para el control de temperatura y humedad en el secado mecánico del café. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(1), 28–46. <https://doi.org/10.14482/inde.40.01.621.004>

- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2021). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Chang, K., Li, J., Jin, Y., & Liu, C. (2024). Development of grain dryer control technology from the perspective of low carbon and intelligentization. *Applied Sciences*, 14(22), 10587. <https://doi.org/10.3390/app142210587>
- Chen, J., Zhang, M., Xu, B., Sun, J., & Mujumdar, A. S. (2020). Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.015>
- Close, C. M., Frederick, D. K., & Newell, J. C. (2019). *Modeling and analysis of dynamic systems* (4th ed.). Wiley.
- Hosseinpour, S., & Martynenko, A. (2022). Application of fuzzy logic in drying: A review. *Drying Technology*, 40(5), 797–826. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1846192>
- Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: A review. *Energies*, 13(21), 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>
- Ogata, K. (2020). *Modern control engineering* (6th ed.). Pearson.
- Osorio, V., & Pabón, J. (2022). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la calidad sensorial del café. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73102. <https://doi.org/10.38141/10778/73102>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2020). *Process dynamics and control* (4th ed.). Wiley.
- Velásquez, S., & Banchón, C. (2023). Influence of pre- and post-harvest factors on the organoleptic and physicochemical quality of coffee: A short review. *Journal of Food Science and Technology*, 60(10), 2526–2538. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05569-z>
- Yu, P., Zhu, W., Shen, C., Qiao, Y., Zhang, W., Zhu, Y., Gong, J., & Cai, J. (2025). Current status of grain drying technology and equipment development: A review. *Foods*, 14(14), 2426. <https://doi.org/10.3390/foods14142426>

Contribución de los autores (CRediT)

Rivadeneira Mendoza, J.: Conceptualización, investigación, metodología, curación de datos, análisis formal, visualización, redacción del borrador original. **Muñoz Sánchez, J.:** Investigación, metodología, curación de datos, análisis formal, validación, visualización, redacción del borrador original. **Zevallos Zambrano, J.:** Supervisión, validación, metodología, revisión y edición del manuscrito, administración del proyecto. **Zambrano Zambrano, Y.:** Investigación, metodología, curación de

datos, análisis formal, validación, visualización, redacción del borrador original. **Palacios Castro, E.:** Análisis formal de datos, Validación, Redacción – borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento

Los autores han declarado que no existe financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles a solicitud razonable al autor de correspondencia.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Declaración sobre el uso de IA generativa y tecnologías asistidas por IA

El manuscrito no incluye una declaración específica respecto al uso de herramientas de inteligencia artificial durante su proceso de redacción. La autoría, así como la responsabilidad total del contenido, recaen exclusivamente en los autores.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2026.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0

Revista Científica *FINIBUS* - ISSN: 2737-6451.

